

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับถั่วเขียว

2.1.1 ความหมาย และการจำแนกลักษณะของถั่วเขียว

ถั่วเขียว (mung bean) ซึ่งในที่นี้รวมไปถึงถั่วเขียวผิวมัน (green gram) ถั่วเขียวผิวทอง (golden gram) และถั่วเขียวผิวดำ (black gram) ซึ่ง Rachie and Robert (1974) ได้จัดอยู่ในกลุ่มของ *Vigna radiata* (L.) Wilczek แต่อย่างไรก็ตาม Verdcourt (1970) ได้แบ่งถั่วเขียวออกเป็น 2 สายพันธุ์ย่อยเพื่อแยกให้เห็นถึงลักษณะของความแตกต่างกัน โดยแยกถั่วเขียวผิวมันและผิวทองอยู่ใน *Vigna radiata* var. *aureous* ซึ่งมีลักษณะของฝักโค้งงอ ขนบนฝักสั้น เมล็ดกลม ไฮลัมหรือตาเรียบ และจัดถั่วเขียวผิวดำอยู่ใน *Vigna radiata* var. *mungo* ซึ่งมีลักษณะฝักตรง และฝักจะสั้นกว่า และขนบนฝักยาว ไฮลัมโค้ง พิระศักดิ์ (2527) ได้ใช้ *aureous* และ *mungo* สำหรับถั่วเขียวผิวมันและผิวดำตามลำดับ ความแตกต่างระหว่างถั่วเขียวผิวมันและถั่วเขียวผิวดำได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

การจำแนกชนิดของถั่วเขียวในประเทศไทย

ประเทศไทยได้มีการจำแนกประเภทของถั่วเขียวโดยใช้เปลือกของเมล็ด (ทรงเชาว์, 2545) เป็นหลักในการพิจารณา ซึ่งสามารถแบ่งถั่วเขียวออกเป็น 4 ประเภทคือ

1. ถั่วเขียวผิวมัน เมล็ดมีสีเขียวและมัน ลักษณะสีของฝักเมื่อแก่
2. ถั่วเขียวเมล็ดด้าน หรือถั่วเขียวธรรมดา เมล็ดมีสีเขียวด้าน
3. ถั่วเขียวสีทองหรือถั่วทอง เมล็ดมีสีเขียวอมเหลือง
4. ถั่วเขียวผิวดำ มีลักษณะใกล้เคียงกับถั่วเขียวผิวมัน ความแตกต่างระหว่างถั่วเขียวผิวดำและถั่วเขียวผิวมันแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างถั่วเขียวผิวมันกับถั่วเขียวผิวดำ

ลักษณะ	ถั่วเขียวผิวมัน	ถั่วเขียวผิวดำ
1. ขนที่ฝัก	สั้นและเบาบาง	ยาวและแน่น
2. เมล็ด	เล็ก, กลม, สีเขียว เหลืองจน ถึงดำเข้มโดยทั่วไปมีสีเขียวหรือ เขียวแกมเหลือง เปลือกนอกมีรอย นูนของ hypocotyl-radicle axis	ใหญ่และยาวกว่า มีสีดำ หรือน้ำตาลเข้ม โดยทั่วไปมี สีดำ ไม่มีรอยนูนของ hypocotyl-radicle axis
3. ไซลัม	ไม่เว้า	เว้า
4. กิ่งแขนง	น้อยกว่า	มากกว่า
5. ขนาดของใบ	โดยทั่วไปใหญ่กว่า	เล็กกว่า
6. จำนวนฝักต่อต้น	น้อยกว่า	มากกว่า
7. ความยาวฝัก	ยาวกว่า	สั้นกว่า
8. อายุเก็บเกี่ยว	สั้นกว่า (ประมาณ 65-70 วัน)	นานกว่า (ประมาณ 90-120 วัน)

ที่มา : ทรงเชาว์ (2545)

2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของถั่วเขียว (ทรงเชาว์, 2545)

1. เมล็ด (seed) มีรูปร่างกลมยาว (globular) ขนาดเมล็ดค่อนข้างเล็ก ปริมาณ 100 เมล็ด มีน้ำหนักประมาณ 4-8 กรัม เมล็ดประกอบด้วย

1.1. เปลือกนอกเมล็ด (hull) มีสีต่าง ๆ กัน เช่น เขียว เหลือง และดำ ขึ้นอยู่กับลักษณะประจำพันธุ์ โดยทั่วไปมักจะมีสีเขียว ลักษณะยาวแบน และสีขาว ภายในเมล็ดประกอบด้วย ใบเลี้ยง 2 อัน ทำหน้าที่ในการสะสมอาหาร

1.2. ยอดอ่อน (plumule) เป็นส่วนยอดของต้นอ่อนขณะอยู่ในเมล็ด จะเจริญเป็น ใบจริงคู่แรก

1.3. แกนกลางของต้นอ่อนในเมล็ด (hypocotyl-radicle axis) เป็นแถบกลางของต้นอ่อนในเมล็ดมีอยู่ 1 อัน เมื่อเมล็ดงอกจะเจริญเป็นราก และส่วนของลำต้นที่อยู่ใต้ใบเลี้ยงลงมา

2. ราก (root) มีรากแก้วและรากแขนง ทำหน้าที่ดูดซึมธาตุอาหาร บนรากของถั่วเขียว มีปม (nodule) เกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากแบคทีเรียพวกไรโซเบียม (*Rhizobium sp.*) เข้าไปอาศัยอยู่ในราก ทำให้รากถั่วเขียวสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศ และเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบในโตรเจนที่ถั่วเขียวนำมาใช้ประโยชน์ได้

3. ลำต้น (stem) เป็นพืชล้มลุก มีลักษณะลำต้นตั้งตรง เป็นพุ่ม ความสูง ประมาณ 40-130 เซนติเมตร ลำต้นมีการแตกกิ่งแขนงมาก บางพันธุ์มีลำต้นกิ่งเลื้อย บนส่วนต่าง ๆ ของลำต้นมีขนอ่อนปกคลุมอยู่ทั่วไป

4. ใบ (leaf) เป็นแบบใบประกอบ มีใบย่อย 3 ใบ แต่ละใบย่อยมีความกว้าง 1.5-12 เซนติเมตร และยาว 2-20 เซนติเมตร

5. ดอก (flower) มีดอกเป็นช่อ เป็นดอกสมบูรณ์เพศ (perfect flower) คือเกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียอยู่ในดอกเดียวกัน มักจะผสมตัวเองก่อนดอกบาน

6. พัก (pod) มีฝักรูปรางเรียวยาว ส่วนปลายโค้งงอเล็กน้อย มีขนปกคลุมทั่วไป ฝักแก่มีตั้งแต่ สีดำ สีเทา และสีน้ำตาล จนถึงน้ำตาลแก่ ความยาวฝักประมาณ 5-10 เซนติเมตร แต่ละฝักมีเมล็ดประมาณ 10-15 เมล็ด

2.1.3 ความสำคัญทางเศรษฐกิจ (ทรงเชาว์, 2545)

ถั่วเขียวเป็นพืชตระกูลถั่วที่มีความสำคัญของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ปลูกได้ดีในเขตร้อน ชอบอากาศร้อนชื้น ไม่ชอบอากาศหนาวเย็น แหล่งปลูกส่วนใหญ่จะอยู่ในเอเชียประเทศที่มีการปลูกมาก ได้แก่ อินเดีย ไทย เวียดนาม ฟิลิปปินส์ ไต้หวัน อินโดนีเซีย เกาหลี บังกลาเทศ ศรีลังกา มาเลเซีย สาธารณรัฐประชาชนจีน และเนปาล เป็นต้น

สำหรับประเทศไทย ถั่วเขียวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง โดยทั่วไปมีการผลิตถั่วเขียวผิวมัน และถั่วเขียวผิวดำ การผลิตไม่ได้ปลูกเป็นพืชหลักแต่ปลูกเป็นพืชประกอบร่วมกับพืชอื่นๆ เช่น ปลูกตามหลังข้าวในบริเวณที่นา หรือก่อนพืชไร่อื่นๆ เช่น ปลูกก่อนการปลูกถั่วเหลืองหรือปลูกตามหลังข้าวโพดไร่ ในปัจจุบันจะพบว่าถั่วเขียวเป็นพืชตระกูลถั่วที่มีแนวโน้มว่าเกษตรกรให้ความสนใจที่จะทำการเพาะปลูกมากขึ้น ทางราชการส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกถั่วเขียวผิวมันเป็นพันธุ์มาตรฐานในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกัน 3 พันธุ์คือ พันธุ์อุทอง 1 พันธุ์กำแพงแสน 1 และพันธุ์กำแพงแสน 2 (ทรงเชาว์, 2545)

ถั่วเขียวผิวมันผลิตได้ในแต่ละปีใช้ภายในประเทศประมาณ 40 % และส่งออกต่างประเทศประมาณ 60 % ส่วนที่ใช้ภายในประเทศนั้นจะใช้ในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ นำไปกะเทาะเป็นถั่วซีกเพื่อนำไปประกอบอาหาร และขนมต่างๆ แปรรูปเพื่อสกัดเอาแป้งทำวุ้นเส้นหรือแป้งถั่ว และทำถั่วงอก ต่างประเทศนั้นส่วนใหญ่จะนำเข้าไปใช้เพาะเป็นถั่วงอก ทำวุ้นเส้นหรือแป้งถั่ว ซึ่งบริโภคกันในหมู่ชาวเอเชียเท่านั้น ส่วนในประเทศในแถบอเมริกา ยุโรป นำเข้าเพื่อให้ผู้อพยพเข้าไปอยู่ในประเทศเหล่านั้นบริโภค

สำหรับถั่วเขียวผิวดำ ผลิตได้ในแต่ละปีใช้ภายในประเทศประมาณ 10 % และส่งออกต่างประเทศประมาณ 90 % ส่วนที่ใช้ภายในประเทศส่วนใหญ่จะใช้เพาะถั่วงอกรวมกับถั่วเขียวผิวมัน ซึ่งถั่วงอกที่เพาะจากถั่วเขียวผิวดำจะมีลักษณะอวบ และเก็บรักษาไว้ได้นาน ต่างประเทศนั้นผู้ซื้อรายใหญ่คือ ญี่ปุ่นซึ่งนำไปเพาะถั่วงอก อินเดีย ปากีสถาน และประเทศอื่นๆ นำไปใช้ทำอาหารจำพวกแป้งและเพาะเป็นถั่วงอก มีตลาดค่อนข้างจำกัด

2.1.4 คุณค่าทางโภชนาการและการใช้ประโยชน์จากถั่วเขียว

การใช้ประโยชน์จากแป้งถั่วเขียวในอุตสาหกรรมนิยมนำมาใช้ในการ โม่แบบแห้งและ โม่แบบเปียกหรือ โม่แบบใช้น้ำ (สมชาย, 2523) เพื่อการนำไปใช้แตกต่างกัน คือ

การ โม่แบบแห้ง โดยนำเมล็ดถั่วเขียวที่กะเทาะเปลือก (peeled mung bean) แล้วมาบดด้วยเครื่องโม่ให้ละเอียดเป็นแป้ง (mung bean flour) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ แป้งยังมีโปรตีนหลักโดยมีกลูเตนิน (glutenin or glutelin) และไกลอะดลิน (gliadin) รวมตัวกันเป็นกลูเตน (gluten) ทำให้เกิดลักษณะของโครงข่ายโปรตีนในผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์คงรูปและมีความเหนียวนุ่ม

สำหรับการบดแบบเปียก โดยนำเมล็ดถั่วเขียวกะเทาะเปลือกแช่น้ำจนนิ่ม บดพร้อมผสมน้ำลงไป แยกแป้งออกจากน้ำ การผสมน้ำมากจะมีส่วนช่วยชะล้างแป้งและ โปรตีนออกมาได้มาก น้ำสีเขียวนี้เป็นน้ำที่มีโปรตีนละลายอยู่สามารถนำไปตกตะกอนโปรตีนใช้เป็นส่วนผสมอาหารสัตว์ หรือใช้ผลิตซีอิ๊วได้ และแป้งที่ได้ทำให้แห้งแล้วบดส่วนที่แห้งให้ละเอียดเป็นแป้งถั่วเขียวหรือสตาร์ช (mung bean starch) ปริมาณของสารประกอบอื่นๆที่อยู่ในสตาร์ชหรือที่ภาคอุตสาหกรรมยอมรับว่าเป็นสตาร์ชต้องมีโปรตีน น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 % ไบมันต้องน้อยกว่า 1 % (อรอนงค์ และคณะ, 2531)

ส่วนใหญ่การนำสตาร์ชดิบมาใช้ยังไม่ค่อยแพร่หลาย เนื่องจากคุณสมบัติบางประการไม่เหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ จึงได้มีการดัดแปรสตาร์ช (modified starch) เพื่อให้มีความหลากหลายในการนำไปใช้มากขึ้น

ถั่วเขียวมีคุณค่าทางโภชนาการสูง จัดเป็นพืชอาหารไม่ใช่พืชน้ำมัน ทั้งนี้เพราะเมล็ดถั่วเขียวประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนมากกว่าน้ำมัน องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว ทั้งเมล็ดดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณโดยน้ำหนัก (%)
คาร์โบไฮเดรต	58
โปรตีน	24
ไขมัน	1
เส้นใย	3
เถ้า	4
ความชื้น	10

ที่มา : สมชาย (2523)

ถั่วเขียวมีโปรตีนใกล้เคียงกับเนื้อปลาและเนื้อไก่ และมีคาร์โบไฮเดรตสูงกว่าถั่วอื่นๆ นอกจากนี้ยังมีวิตามินต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อร่างกาย มีไขมันค่อนข้างต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับถั่วลิสงและถั่วเหลือง และยังมีคุณสมบัติในแง่ที่เป็นอาหารประเภทย่อยง่าย ไม่ทำให้ท้องอืดเหมือนถั่วอื่น ๆ ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ทำเป็นอาหารสำหรับเด็ก ผู้พักฟื้น หรือคนชรา (ทรงเชาว์, 2545)

ถั่วเขียวต้ม (boiled mung bean) 100 กรัมให้พลังงาน 110 กิโลแคลอรี หรือ 440 กิโลจูล มีปริมาณ คาร์โบไฮเดรต 19.15 กรัม น้ำตาล 2.00 กรัม เส้นใยจากอาหาร 7.6 กรัม ไขมัน 0.38 กรัม โปรตีน 7.02 กรัม วิตามินซี 1.00 มิลลิกรัม แคลเซียม 27 มิลลิกรัม แมกนีเซียม 0.298 มิลลิกรัม ฟอสฟอรัส 99 มิลลิกรัม โพแทสเซียม 266 มิลลิกรัม โซเดียม 2 มิลลิกรัม (USDA Nutrient database)

ถั่วงอก (mung bean sprouts) เมื่อนำมาเพาะเป็นถั่วงอก ปริมาณ โปรตีนและแป้งลดลง เหลือประมาณ 6.6 และ 3.8 % (สมชาย, 2523; Mubarak, 2005)

แป้งถั่วเขียว (mung bean starch) ที่สกัดได้จากทุกสายพันธุ์ มีความบริสุทธิ์สูง และมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกัน โดยเม็ดแป้งส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นวงรีและมีขนาดประมาณ 18 ถึง 25 ไมครอน แป้งถั่วเขียวมีกำลังการพองตัว และค่าการละลายได้ค่อนข้างต่ำซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจาก ปริมาณอะไมโลสที่มีอยู่สูง (30 - 32 %) ขั้วขวางการพองตัวของเม็ดแป้ง แป้งถั่วเขียวมีความคงตัว สูงและมีความเหนียวคล้ายคลึงกันทุกสายพันธุ์ สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ alpha-amylase และ glucoamylase ได้ดี (สุนีย์และคณะ, 2543)

สตาร์ชของพืชตระกูลถั่วย่อยได้ช้ากว่าสตาร์ชของธัญชาติ ถั่วเขียวมีค่า GI ต่ำเป็น แหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ดี เป็นแป้งย่อยได้ช้าหรือแป้งทน (retrograded starch, RS3 resistant) (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2550) ซึ่งมีประโยชน์ต่อร่างกาย การบริโภคอาหารที่มี GI ต่ำเป็นเวลานาน จะลดความเสี่ยงต่อโรคเบาหวานและโรคหัวใจ (Foster-Powell *et al.*, 2002)

กระบวนการแปรรูป ได้แก่ การเอาเปลือกออก (dehulling) การแช่น้ำ (soaking) การงอก (germination) การต้ม (boiling) การนึ่งภายใต้ความดัน และไมโครเวฟมีผลต่อคุณค่า ทางอาหารและกรดอะมิโนที่จำเป็นในถั่วเขียว พบว่าการงอกและการทำให้สุกทำให้สูญเสียไขมัน คาร์โบไฮเดรต กรดอะมิโนที่จำเป็นและปริมาณเถ้า ทุกกระบวนการแปรรูปทำให้ ไลซีน (lysine) ทริปโตเฟน (tryptophan) ทรีโอนีน (threonine) และกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์ (sulfur) เป็น องค์ประกอบมีปริมาณลดลง (Mubarak, 2005)

ถั่วเขียวใช้ทำขนมต่างๆ เช่น ถั่วเขียวต้มน้ำตาล เต้าส่วน เม็ดขนุน ใส่นมต่างๆ ถั่ว ทอ (ถั่วทอด) แป้งถั่วเขียวนั้นใช้ทำเส้น เส้น ซาหริ่ม และเส้นก๋วยเตี๋ยวแข็งใส

นอกจากนี้ลำต้นยังใช้เป็นอาหารปศุสัตว์ในรูปหญ้าสด (fodder) หรือหญ้าแห้ง (hay) กากถั่วเขียวใช้ทำอาหารชั้นสำหรับโคนม และยังใช้เป็นพืชสำหรับปรับปรุงดินในรูปของปุ๋ยพืชสด (green manure) และพืชสำหรับคลุมดิน (cover crops)

2.2 กระบวนการเอกซ์ทรูชัน

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารประเภทขนมขบเคี้ยว (snack) หรืออาหารเช้าธัญชาติ (breakfast cereal) ที่เตรียมจากธัญชาติที่มีรูปร่างและกลิ่นรสแตกต่างกันส่วนหนึ่งโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ซึ่งเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่รวมเอาหน่วยปฏิบัติการหลายหน่วยเข้าด้วยกัน ได้แก่ การผสม การทำให้สุก การนวด การเนียน การขึ้นรูปและการทำให้เกิดรูปร่าง เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภททำให้วัตถุดิบสุก (cooking extruder) เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถให้ความร้อนกับอาหารได้ถึง 200 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันจึงเป็นการทำให้สุกและเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของส่วนผสมต่างๆเรียกกระบวนการนี้ว่าการทำให้สุกโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion cooking) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาสั้น (HTST: high temperature short time) โดยจะลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ และทำลายเอนไซม์ ผลิตภัณฑ์จะผ่านการอบแห้งหรือทอด ทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าเอนเอร์จี้ต่ำลง (รุ่งนภา, 2541)

ข้อดีของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน คือ สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายในด้านของรูปร่าง ลักษณะเนื้อสัมผัส สี กลิ่น และรสชาติ โดยใช้ส่วนผสมพื้นฐานเหมือนกัน แต่ปรับกระบวนการทำงานของเครื่องซึ่งปัจจัยที่สำคัญคือสภาวะในการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์และสมบัติทางรีโอโลยี (rheological property) ของอาหารในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งสภาวะในการทำงานได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของได และอัตราการเนียน นอกจากนี้สมบัติของวัตถุดิบเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อลักษณะเนื้อสัมผัส และสีของผลิตภัณฑ์ สมบัติทางกายภาพของส่วนผสม ความชื้นและส่วนประกอบทางเคมีโดยเฉพาะปริมาณและชนิดของสตาร์ช โปรตีน ไขมัน และน้ำตาล

ส่วนผสมที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ประกอบด้วยธัญชาติที่ผ่านการบดเป็นแป้ง นอกจากนี้ยังมีส่วนผสมอื่นๆที่เป็นวัตถุดิบรอง ได้แก่ ไขมัน น้ำตาล เกลือ กรดหรือด่าง สารอิมัลซิไฟเออร์ สี และกลิ่นรส น้ำจะเติมเข้าไปเพื่อปรับส่วนผสมให้มีความชื้นอยู่ในระดับ 10-40%

สกรู เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยลักษณะของสกรูและความเร็วของการหมุนมีผลต่อกระบวนการเอกซ์ทรูชัน การเคลื่อนที่ของส่วนผสมของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เกิดขึ้นจากเกลียวที่อยู่ตามแนวแกนความยาวของสกรู โดยขณะที่สกรูหมุนเกลียวจะผลักให้ส่วนผสมต่างๆ เคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยทั่วไปผนังของบาร์เรลมักทำเป็นร่อง

เพื่อเพิ่มความฝืดและลดความลื่น สกรูในส่วนที่ทำหน้าที่ป้อนมักจะมีลักษณะสันเกลียวที่ลึก ซึ่งจะรับส่วนผสมของอาหารที่ป้อนเข้าสู่เครื่อง ส่วนผสมของวัตถุดิบมีลักษณะเป็นอนุภาคหรือลักษณะเป็นเม็ดๆ และผ่านการปรับความชื้นแล้ว สกรูจะพาส่วนผสมเหล่านี้เคลื่อนไปตามความยาวสกรู ขณะที่ส่วนผสมเคลื่อนไปตามสกรูก็จะได้รับการอัดเพิ่มขึ้น ทำให้ส่วนผสมอาหารเหล่านี้บรรจุลงในช่องว่าง (channel) ที่มีอยู่ระหว่างเกลียว ส่วนที่สองของสกรูจะเป็นช่วงของการอัดหรือการเปลี่ยน โดยสกรูมีความสูงของเกลียวหรือสันเกลียวลดลง หรืออาจใช้วิธีการอื่นที่ทำให้ความสามารถ ในการขนถ่ายของสกรูลดลง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการอัดมากขึ้น ส่วนผสมของอาหารจะหมุน อยู่ในช่องว่างของสกรูขณะที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้า และเกิดเป็นมวลที่ต่อเนื่อง

พลังงานที่ทำให้ส่วนผสมมีลักษณะขั้นหนีคนี้ไหล ได้มาจากมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่ใช้หมุนสกรู การเลื่อนระหว่างกระบวนการไหลจะทำให้พลังงานกลหมดไป โดยทำให้อุณหภูมิของส่วนผสมเพิ่มขึ้น และเปลี่ยนส่วนผสมของอาหารไปเป็นมวลที่หลอมเหลว เมื่อส่วนผสมออกจากไค ความดันจะถูกปลดปล่อยออกมา ทำให้เกิดการพองตัว (puffing) อย่างทันทีที่อุณหภูมิสูง การพองตัว ส่วนใหญ่เกิดจากไอน้ำที่ออกจากน้ำในผลิตภัณฑ์ที่ถูกทำให้ร้อนขึ้น การสูญเสียความชื้นและความร้อนในผลิตภัณฑ์ร่วมกับการพองตัว ทำให้อุณหภูมิจากผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็วจนมีอุณหภูมิตั้งแต่ 80 องศาเซลเซียส เอกซ์ทรูเดตที่ขยายตัวจะมีโครงสร้างของเซลล์เปิดซึ่งประกอบด้วยเซลล์ที่แต่ละเซลล์ถูกล้อมรอบด้วยเมมเบรนของแป้ง ขนาดของเซลล์เหล่านี้จะควบคุมลักษณะเฉพาะที่สำคัญของผลิตภัณฑ์คือ ลักษณะเนื้อสัมผัสและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ เอกซ์ทรูเดตเหล่านี้มักจะถูกตัดด้วยใบมีดที่ตั้งอยู่ด้านหน้าของไค เพื่อให้เอกซ์ทรูเดตที่มีความยาวตามต้องการ แล้วอบต่อในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนให้มีความชื้น 2-12% ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการอาจเคลือบด้วยสี กลิ่น รส น้ำมัน และน้ำตาล การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปส่วนใหญ่ ขึ้นกับปริมาณความชื้นของส่วนผสมที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการเอกซ์ทรูชัน อุณหภูมิที่จุดออกจากเครื่อง ระดับหรือปริมาณของความเสียหายของส่วนผสมที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไหล และลักษณะรูปร่างของไค (รุ่งนภา, 2541)

ถึงแม้กระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่สามารถกระทำได้ง่าย แต่การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นสิ่งที่ไม่ได้ค่อนข้างยาก ปัจจัยต่างๆของวัตถุดิบ เช่น ความชื้น ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ล้วนมีผลต่อคุณภาพของเอกซ์ทรูเดตในด้านอัตราการพองตัว และคุณภาพของเอกซ์ทรูเดต ได้มีงานวิจัยที่ศึกษาถึงผลของปัจจัยต่างๆ ต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวเพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ ให้มีลักษณะเนื้อสัมผัส และคุณภาพอื่นๆให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (เนตรนภิสและคณะ, 2538)

2.2.1 อิทธิพลของวัตถุดิบต่อกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

Harper (1981) รายงานว่า อะไมโลสจะมีผลต่อความเหนียวและความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ อะไมโลสจะทำให้การเคลื่อนที่ของแป้งในบาร์เรลยากขึ้น ปริมาณอะไมโลสในแป้งมากขึ้นทำให้การพองตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง และจะทำให้การละลายน้ำได้ลดลงด้วย

การนึ่งข้าวและแป้งข้าวมผ่านเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่อุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะได้เอกซ์ทรูเดทที่มีอัตราการพองตัวสูง แป้งที่มีมีอะไมโลสสูงจะได้เอกซ์ทรูเดทที่มีอัตราการพองตัวลดลง การพองตัวยังขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน การเพิ่มโปรตีนทำให้การพองตัวของเอกซ์ทรูเดทลดลง

ผลขององค์ประกอบทางเคมีกายภาพของปลายข้าวผสมในกระบวนการเอกซ์ทรูชันโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ พบว่าปริมาณอะไมโลส ไขมัน โปรตีน เป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณสมบัติทางรีโอโลยี การเพิ่มของขนาดวัตถุดิบ ปริมาณโปรตีน หรือปริมาณไขมัน เป็นผลให้ความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดทเพิ่ม และอัตราการพองตัวลดลง การเพิ่มปริมาณโปรตีนและปริมาณไขมันเป็นผลให้ค่า setback ของเอกซ์ทรูเดทลดลง (กฤษณีและคณะ, 2548)

แป้งข้าวเจ้าอะไมโลสต่ำจะทำให้การดูดซึมน้ำและการเกิดเจลขณะเอกซ์ทรูชันดีขึ้น สำหรับอะไมโลเพคตินจะส่งเสริมให้การพองตัวของผลิตภัณฑ์มากขึ้น (Lee *et al.*, 1999) สอดคล้องกับรายงานของ Bhattacharya (1997) อุณหภูมิที่สูงกับความเร็วของสกรูที่ต่ำทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการพองตัวเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นมีผลให้การพองตัวของผลิตภัณฑ์จะลดลง (ศราวดีและอวยพร, 2546) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ding *et al.*, (2006) การเพิ่มความชื้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์พองตัวได้น้อยลง

การเพิ่มอัตราการป้อน และการเพิ่มความชื้นส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ได้ ทำให้มีความแข็งสูงขึ้น และแตกหักง่าย (Ding *et al.*, 2006) สอดคล้องกับงานวิจัยของ ศราวดีและอวยพร (2546) ปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นมีผลให้ทำให้ผลิตภัณฑ์ มีความแข็งมากขึ้น การเพิ่มความเร็วมอเตอร์ทำให้ความหนาแน่นและความแข็งลดลง อุณหภูมิของบาร์เรลที่สูงขึ้นทำให้ความแข็งลดลง แตกหักยากขึ้น (Ding *et al.*, 2006)

การเพิ่มความชื้นส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวมีความหนาแน่นสูงขึ้น การเพิ่มความเร็วมอเตอร์ทำให้ความหนาแน่นลดลง (Ding *et al.*, 2006) สอดคล้องกับงานวิจัยของศราวดี และอวยพร (2546) เมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นมีผลให้การพองตัวของผลิตภัณฑ์ลดลงส่งผลให้ความ

หนาแน่นเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของบาร์เรลที่สูงขึ้นทำให้ความหนาแน่นลดลง (Ding *et al.*, 2006)

ปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นสามารถป้องกันโครงสร้างของเม็ดแป้งไม่ให้ถูกทำลายได้ ทำให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง อุณหภูมิของบาร์เรลที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง (Ding *et al.*, 2006) สำหรับเวลาในการนึ่งปลายข้าวมีผลต่อความแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำและความสามารถในการละลายน้ำ (เมธาวิและสุริย์, 2548)

การเพิ่มความชื้นส่งผลให้ความสามารถในการละลายน้ำสูงขึ้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น (Ding *et al.*, 2006) สอดคล้องกับงานวิจัยของ สราวุฒิและอวยพร (2546) อุณหภูมิและความเร็วสกรูมีผลทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น

ชนิดของแป้ง แป้งข้าวโพดมีอัตราการพองตัวสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณสตาร์ชและอะไมโลสสูงกว่าแป้งสาลี และแป้งข้าวเจ้า และมีปริมาณโปรตีนและไขมันต่ำกว่า (สิงหนาทและคณะ, 2550) ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณสตาร์ช (Mercier *et al.*, 1989) และอะไมโลส (Chinnaswamy and Hanna, 1988) สูงขึ้น และอาจเกิดจากโครงสร้างของโปรตีนที่แตกต่างกันโดยในแป้งสาลีมีโปรตีนอยู่ในรูปของ fibrillar form ซึ่งสามารถขยายตัวได้เมื่อให้ความดัน

การผลิตอาหารเข้าพร้อมบริโภคชนิดแผ่นจากแป้งถั่วเขียวทดแทนแป้งสาลีบางส่วน โดยแปรปริมาณแป้งถั่วเขียวที่ระดับ 5, 10, 15 และ 20 % โดยน้ำหนัก ทดสอบค่าแรงกด และอัตราการพองตัวพบว่า ค่าแรงกดสูงขึ้น ในขณะที่อัตราการพองตัวลดลงเมื่อปริมาณแป้งถั่วเขียวเพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์จากแป้งถั่วเขียวทดแทนแป้งสาลีที่ระดับ 5, 10, 15 และ 20 % โดยน้ำหนัก พบว่า ปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 11.36 – 23.24 % ไขมันอยู่ในช่วง 4.08 – 4.28% ความชื้น อยู่ในช่วง 4.28 – 5.57% เถ้าอยู่ในช่วง 2.08 ถึง 4.38% และเส้นใยอยู่ในช่วง 1.31 – 1.98% การประเมินทางประสาทสัมผัส พบว่าผลิตภัณฑ์จากแป้งถั่วเขียวทดแทนแป้งสาลีที่ระดับ 5 และ 10 % ผู้บริโภคให้การยอมรับสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (จิรนากและจำเนียร, 2549)

วัตถุประสงค์ความชื้นต่ำจะเคลื่อนที่ภายในบาร์เรลได้ยากทำให้เกิดแรงเฉือนมากขึ้นและใช้เวลานานขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์พองตัวและละลายน้ำได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามวัตถุประสงค์ที่มีความชื้น

ต่ำมากก็จะเพิ่มแรงเฉือนและใช้เวลานานมากขึ้นอีกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นมากด้วย เม็ดแป้งจะถูกทำลายเกิดเป็นเดกซ์ทรินและการพองตัวจะลดลง (Gomez and Aguilera, 1984)

Lee *et al.*, (1999) ได้ศึกษาพบว่า อัตราการพองตัวและการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์จะลดลงเมื่อความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้น พบว่าความเร็วสกรูสำหรับแป้งข้าวโพดชนิดที่ปริมาณอะไมโลส 25 % คือ 150 รอบต่อนาที ความเร็วสกรูเพิ่มขึ้นทำให้เกิดเจลลดลงเนื่องจากเวลาการเอกซ์ทรูชันสั้นลง และพบว่าที่ความเร็วสกรูมากจะทำให้เกิดการทำลายเม็ดแป้งมากขึ้น

2.3 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไบโอโพลิเมอร์

แป้งเป็นส่วนผสมหลักในการทำผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ผ่านการเอกซ์ทรูชัน และในรสชาติที่พร้อมบริโภค (ready-to-eat : RTE) แป้งเป็นของแข็งแห้งมีลักษณะเป็นผง ผลิตจากวัตถุดิบได้หลากหลายจากพวกพืชหัว เช่น หัวมันสำปะหลัง มันเทศ หรือจากธัญชาติ เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี หรือจากพวกถั่วต่างๆ เช่น ถั่วเขียว ถั่วเหลือง การผลิตแป้งนั้นต้องผ่านกระบวนการโม้ ซึ่งอาจใช้วิธีการโม้เปียก(ใช้น้ำในระหว่างการโม้)หรือการโม้แห้งและแป้งที่ได้จะยังมีองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และสิ่งเจือปนอื่นๆ สำหรับสตาร์ช เป็นส่วนที่ได้จากการสกัดไขมันและโปรตีนออกจากแป้งโดยใช้สารเคมี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการสกัดหรืออาจใช้สารเคมีอื่นๆก็ได้ที่เหมาะสมกับวัตถุดิบแต่ละชนิด โครงสร้างหลักของสตาร์ช จะเป็นสายโซ่ยาวต่อกันของน้ำตาลกลูโคส ในรูปของอะไมโลเพกตินและอะไมโลส ซึ่งสองส่วนนี้จะมีการจัดเรียงตัวแบบ semicrystalline อยู่ในแกรนูลสตาร์ช โดยอะไมโลเพกติน มีลักษณะการจัดเรียงตัวเป็นกิ่งก้านด้วยพันธะ 1-4 และ 1-6 glucosidic linkage ส่วนอะไมโลสมักเป็นสายโซ่ยาวที่ต่อกันด้วยพันธะ 1-4 glucosidic linkage สตาร์ชมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส และมีความบริสุทธิ์มากกว่าแป้งเนื่องจากแป้งยังมีส่วนประกอบของพวกโปรตีนและไขมันรวมอยู่ องค์ประกอบที่แตกต่างกันนี้ส่งผลให้สตาร์ชและแป้ง มีสมบัติในด้านต่างๆ แตกต่างกันมาก (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2550)

กระบวนการเอกซ์ทรูชันเกี่ยวข้องกับการทำให้ส่วนผสมของคาร์โบไฮเดรต และโปรตีน สุก ทำให้เกิดรูปร่างเนื้อสัมผัส และเกิดการพองตัว หรือเกิดการขยายตัว กระบวนการเอกซ์ทรูชันแตกต่างจากกระบวนการอื่นๆ คือขั้นตอนต่างๆ ของการแปรรูปเหล่านี้เกิดขึ้นที่ความร้อนค่อนข้างต่ำภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิและแรงเฉือนสูงมากเป็นเวลาดสั้นๆ ซึ่งภายใต้สภาวะเช่นนี้แป้งและ

โปรตีนที่ยังมีลักษณะตามธรรมชาติ จะมีการเปลี่ยนรูปเพื่อให้อาหารที่มีโครงสร้างใหม่ภายใต้สภาวะที่ความชื้นต่ำที่ใช้ สำหรับกระบวนการเอกซ์ทรูชัน การเกิดเจลาติโนเซชันของเม็ดแป้งขึ้นกับผลรวมกันของความร้อนและแรงเฉือนทางกล เม็ดแป้งจะถูกเฉือนขณะที่เคลื่อนผ่านเครื่องเอกซ์ทรูชัน การกระทำทางกลนี้จะเปิดคราโนลาภายในของแป้งออก การไหลของส่วนผสมต่างๆที่เหนียวในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ต้องอาศัยพลังงานทางกลจำนวนมากเพื่อใช้หมุนสกรู ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลขนาดใหญ่บางโมเลกุลจะแตกออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง เรียกการเกิด เดกซ์ตรีโนเซชัน (dextrinisation) ผลของการเฉือนทำให้แป้งสามารถละลายในน้ำได้มากขึ้น ผลของการเกิดเจลาติโนเซชันและเดกซ์ตรีโนเซชัน คือ ได้โคที่เหนียวที่สามารถเอกซ์ทรูตผ่านได เพื่อขึ้นรูปและพองเมื่อความชื้นภายในโคซึ่งมีอุณหภูมิสูงเปลี่ยนไปเป็นไอน้ำหลังออกจากโคแล้ว (รุ่งนภา, 2541)

ความก้าวหน้าของกระบวนการเอกซ์ทรูชันสามารถควบคุมสภาวะของการเฉือนระหว่างกระบวนการทำให้สุก เพื่อให้ได้ความหนาแน่น และลักษณะเนื้อสัมผัสเมื่อชิม และลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ การควบคุมสภาวะการเฉือนต่อการสุกเป็นผลจากการออกแบบสกรูแบบต่างๆ อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ความเร็วสกรู แบบของโค ความดันหน้าแปลน ความชื้นของส่วนผสมของอาหาร อุณหภูมิภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แต่ละโซนและความเร็วสกรู มีผลต่อลักษณะหรือคุณภาพที่สำคัญของเอกซ์ทรูเดต เช่น ลักษณะเนื้อสัมผัส ความพองตัว ความกรอบ ความหนาแน่น ความสามารถในการละลายน้ำ การดูดซึมน้ำ เป็นต้น

สภาวะการเดินเครื่อง ที่มีความเร็วสกรูต่ำ ปริมาณความชื้นของส่วนผสมมาก ทำให้มีแรงเฉือนต่ำ กระบวนการให้ความร้อนในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทำให้ได้เอกซ์ทรูเดตที่มีลักษณะแข็ง น้ำหนักเบา รูภายในเอกซ์ทรูเดตมีขนาดใหญ่ ผนังเซลล์หนา ความสามารถในการดูดน้ำได้น้อย ส่วนเอกซ์ทรูเดตที่ได้จากกระบวนการให้ความร้อนในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีแรงเฉือนสูงจะมีลักษณะนุ่ม มีความสามารถในการดูดน้ำดี มีแนวโน้มที่จะเหนียวติดฟันเมื่อบริโภค มีขนาดของรูภายในเอกซ์ทรูเดตที่เล็กและผนังเซลล์บางกว่า

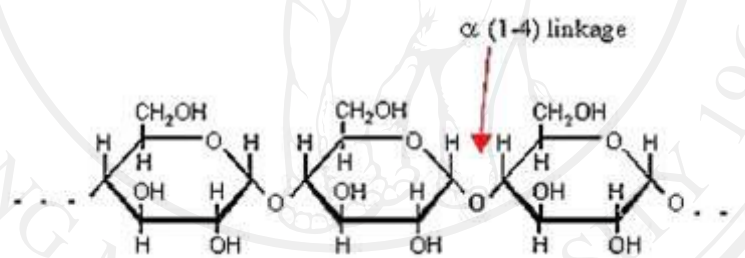
2.4 แป้ง (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2550)

แป้งเป็นโพลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งมีหน่วยพื้นฐานเป็น anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -glycosidic linkage ที่คาร์บอน

ตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี anomeric carbon (C_1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง reducing end 1 ตำแหน่ง โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส ซึ่ง มีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และอะไมโลเพคติน ซึ่งมีขนาดใหญ่และ มีกิ่งก้านสาขามาก

2.4.1 อะไมโลส

อะไมโลสเป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4 –glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.1 อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลส

ที่มา : <http://www.eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>

อะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของ อะไมโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของอะไมโลส ยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) ลดลง ปริมาณและสมบัติของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ

แป้ง	ปริมาณอะไมโลส (% น้ำหนักแห้ง)
ข้าวสาลี	25.8
ข้าวโพด	22.5
ข้าวเจ้า	20.5
ข้าวบาร์เลย์	23.6
มันฝรั่ง	16.9
มันสำปะหลัง	17.8
พุทธรักษา	22.7
ถั่วเขียว	30.7

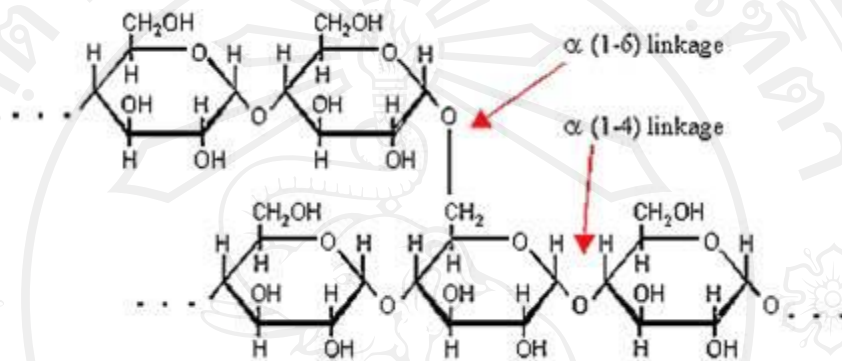
ที่มา : Kasemsuwan *et al.*, (1999)

อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น butanol, fatty acid, surfactant, phenol และ hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ อะไมโลสที่มีความยาวสายโซ่มากกว่า 45 หน่วยกลูโคสเมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินม่วง ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบ และใช้ในการตรวจสอบปริมาณอะไมโลสในแป้ง

การตรวจสอบปริมาณอะไมโลส โดยการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และวัสดุที่เกิดขึ้น เป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้กันมาก แต่อาจมีข้อผิดพลาดได้จากความไม่อยู่ตัวของสีที่เกิดขึ้น การรบกวนผลการวัดจากอะไมโลเพคติน โดยเฉพาะอะไมโลเพคตินที่มีความยาวสายโซ่มากๆ ซึ่งจะเกิดสารเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกันทำให้วิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสได้มากเกินจริง นอกจากนี้ไขมันที่เกิดสารเชิงซ้อนกับอะไมโลสอยู่เดิมจะทำให้อะไมโลสโมเลกุลนั้นจับกับไอโอดีน ไม่ได้ทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง จึงต้องทำการสกัดไขมันออกก่อน

2.4.2 อะไมโลเพคติน

อะไมโลเพคตินเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย พันธะ α -1, 4- glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นโพลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 6-glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน

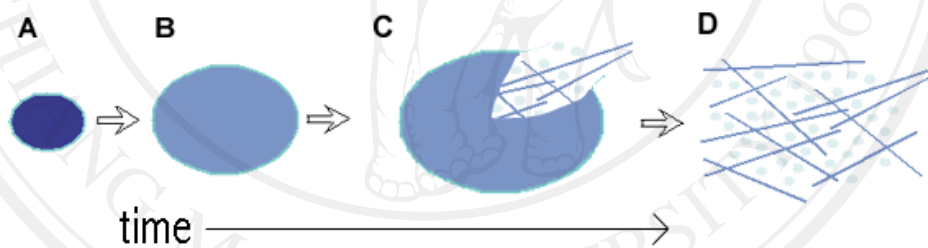
ที่มา : <http://www.eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α -1, 6 glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสใน อะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลสคือ ประมาณ 107 ถึง 109 คาลตัน และมีการกินตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียว จึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

2.5 การเกิดเจลลาตินในเซชัน (กล้านรงค์และเกื้อกุล, 2550)

เมื่อนำแป้งใส่น้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซับน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่พองตัวหรือพองตัวได้จำกัดมากและสังเกตได้ยาก เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในส่วนที่เป็น crystallite จับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบและมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75 องศาเซลเซียส หรือใช้สารเคมี เช่น ให้ความร้อน 60 องศา

เซลเซียส แก่แป้งจะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วน crystallite ลดลง เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) (รูปที่ 2.3) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาติไนเซชัน” ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญขึ้นคือ มีการพองตัวของเม็ดแป้งและเครื่องหมายกากบาท (maltese cross) ภายในเม็ดแป้งหายไป อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างส่วน crystallite ที่แตกต่างกัน ทั้งระดับการจับกัน (degree of association) และความสม่ำเสมอของการเกิดเจลาติไนซ์ไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกันก็ตาม อาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันที่ห่างกันถึง 8-10 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปเม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาติไนซ์ได้ก่อนขนาดเล็ก



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน

ที่มา : <http://www.eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>

การคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งจากรากหัวมีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากรั้วพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากรากหัว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว และเม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยากที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากรั้วพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็นเมทริกซ์ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน

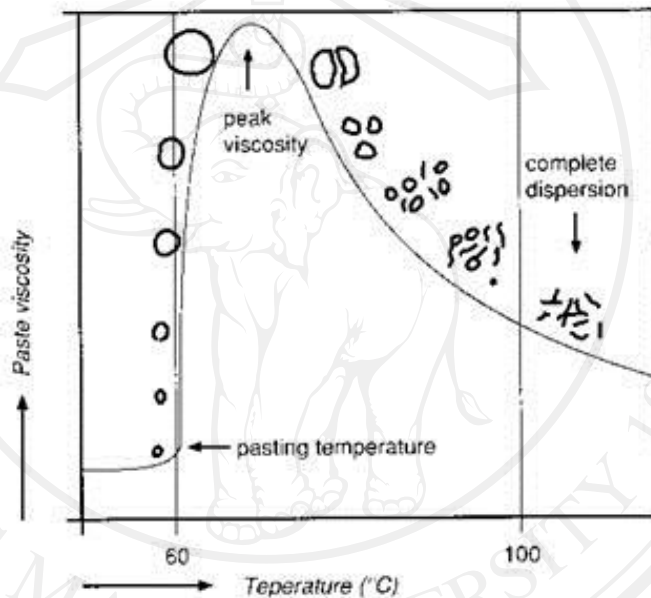
และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพคตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะกะ ยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภท waxy มีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกน้อยกว่าแป้งชนิดอื่น ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืนตัวของน้ำแป้งสุกด้วย โมเลกุลของอะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน

2.6 ความหนืด (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2550)

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้ง ทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีความหนืดมากขึ้น (รูปที่ 2.4) พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงสุดเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้นและมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงการหุงต้มที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง

การติดตามความหนืดของน้ำแป้งสุก (paste) มีหลายวิธี การเลือกเครื่องมือใดนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ ที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดคือ เครื่อง Brabender Amylograph ซึ่งติดตามพฤติกรรมความหนืดของแป้งตลอดช่วงการให้ความร้อนและการทำให้เย็นลง โดยแสดงผลในรูปของความหนืดที่เปลี่ยนไปกับเวลา หน่วยความหนืดที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Brabender Amylograph คือ Brabender Unit (B.U.) สามารถเปลี่ยนหน่วยไปเป็น centripoise ได้โดยความหนืด

ของสารละลายแป้งสูก 5 % 500 B.U. เทียบเท่ากับ 2700 centipoise เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) (รูปที่ 2.5) เป็นเครื่องมือที่ได้รับการพัฒนามาเพื่อติดตามพฤติกรรมความหนืดของแป้งอีกแบบหนึ่ง คุณสมบัติพิเศษของเครื่องนี้คือ สามารถเปลี่ยนระดับอุณหภูมิทั้งการทำให้ร้อนและเย็นได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ควบคู่ไปกับความสามารถในการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ ทำให้สามารถหา pasting curve ได้ภายใน 13 นาที เนื่องจากมีกลไกในการส่งผ่านความร้อนที่ดีและยังใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่าด้วย



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน

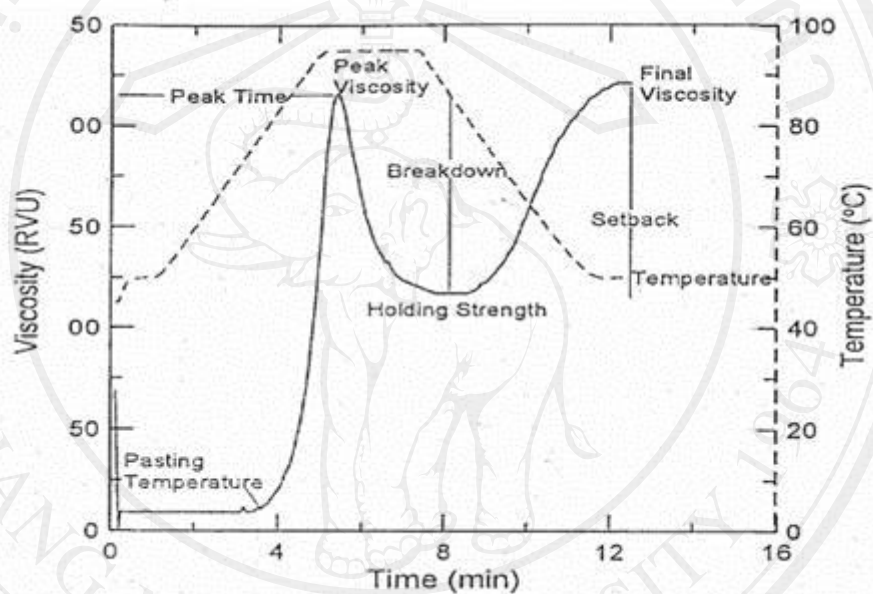
ที่มา : <http://www.eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>



รูปที่ 2.5 เครื่อง Rapid Visco Analyzer

ที่มา : <http://www.eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>

การทำงานของเครื่อง RVA โดยใช้แป้งประมาณ 3 กรัม เติมน้ำ 25 มิลลิลิตร รักษาอุณหภูมิไว้ที่ 50 หรือ 60 องศาเซลเซียส ให้ความร้อนด้วยอัตราประมาณ 12 องศาเซลเซียส ต่อนาที จนได้อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ 2-3 นาที ทำให้เย็นลงด้วยอัตราประมาณ 12 องศาเซลเซียส ต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่าเป็นเวลา 2 นาที เครื่องจะทำการบันทึกอุณหภูมิและ viscosity profile ที่เปลี่ยนไปกับเวลาดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA

ที่มา : <http://www.eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>

ค่าที่เครื่องจะแสดงผลอ่านได้บนจอคอมพิวเตอร์โดยความหนืดมีหน่วยเป็น RVU ดังนี้

- (1) peak time = เวลาที่เกิดพีคของความหนืด (นาที)
- (2) pasting temperature = อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืดหรืออุณหภูมิที่มีความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ใน 20 วินาที (องศาเซลเซียส)
- (3) peak temperature = อุณหภูมิที่เกิดพีค (องศาเซลเซียส)
- (4) holding strength = ความหนืดที่ต่ำที่สุดระหว่างการทำให้เย็น (RVU)
- (5) breakdown = ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (RVU)
- (6) final viscosity = ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง (RVU)

(7) setback form peak = ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดพีค (RVU)

(8) setback form trough = ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (RVU)

Thao and Noomhorm (2011) ศึกษาพฤติกรรมการให้ค่าความหนืดของแป้งข้าวเหนียวด้วยเครื่อง RVA พบว่าแป้งข้าวเหนียวมีค่าต่างๆที่วัดได้จากเครื่อง RVA ดังนี้

peak time	= 4.49±0.08	นาที
pasting temperature	= 76.83±0.03	องศาเซลเซียส
peak viscosity	= 427.31±0.03	RVU
holding strength	= 332.33±0.04	RVU
breakdown	= 94.97±0.75	RVU
final viscosity	= 599.69±7.90	RVU
setback form trough	= 267.36±7.57	RVU

แป้งข้าวเหนียวเมื่อผ่านกระบวนการ annaeling เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ สภาวะควบคุมอุณหภูมิห้อง, 45, 50, 55, 60 องศาเซลเซียส มี pasting temperature อยู่ในช่วง 71.90 - 80.40 องศาเซลเซียส และมี peak viscosity อยู่ในช่วง 245-251 RVU (Chung *et al.*, 2000)

2.7 แป้งที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch)

แป้งเป็นอาหารหลักและแหล่งพลังงานที่สำคัญชนิดหนึ่งของมนุษย์ สามารถพบอยู่ทั่วไปตามส่วนต่างๆของพืช เช่น ในผลของกล้วย ในเมล็ดของธัญชาติ ในหัวของมันสำปะหลัง เป็นต้น เป็นแหล่งวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตอาหารเพื่อสุขภาพสูง ปัจจุบันมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากแป้งหลายชนิด เช่น แป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็กของมนุษย์ (resistant starch, RS) (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2550) แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่ง ที่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยเอนไซม์ และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือกลูโคส ซึ่งสามารถดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานของมนุษย์ เมื่อพิจารณาแป้งจากการถูกย่อยสลายสามารถแบ่งประเภทตามความสามารถถูกย่อยได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ประเภทของแป้งในอาหารเมื่อพิจารณาความสามารถของการถูกย่อยสลายได้

ประเภทแป้ง	แหล่งของแป้ง	การย่อยสลายในลำไส้เล็ก
1. แป้งที่สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch, RDS)	อาหารที่มีส่วนประกอบของแป้งเมื่อผ่านการหุงต้มใหม่ๆ	สามารถถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว ไปเป็นน้ำตาลกลูโคส ภายในเวลา 20 นาที
2. แป้งที่สามารถย่อยสลายได้อย่างช้า (slowly digestible starch, SDS)	แป้งจากธัญชาติดิบ ผลิตภัณฑ์เส้นที่ทำสุกแล้ว	สามารถถูกย่อยสลายได้อย่างช้าๆ แต่ก็ยังถูกย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคสได้อย่างสมบูรณ์ใช้เวลา 20-110 นาที
3. แป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ (enzyme-resistant starch, RS)	เมล็ดธัญพืชที่ถูกด หรือแป้งที่เกิดการคืนตัว	ทนต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก

ที่มา : ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ (2544ก)

แป้งที่ทนต่อการถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ (enzyme resistant starch หรือ resistant starch (RS)) ตามคำนิยามของ European flour-concerted action on resistant starch หมายถึงแป้งและผลิตภัณฑ์ของแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์และดูดซึมภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ได้ แบ่งตามลักษณะและแหล่งที่มาได้ 3 ประเภท

1. แป้งที่มีลักษณะทางกายภาพขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ (physically inaccessible starch, RS1) โดยเม็ดแป้งจะถูกห่อหุ้มอยู่ในร่างแหของโปรตีน หรือถูกตรึงอยู่ในเซลล์หุ้มเมล็ดพืช ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในเม็ดแป้งได้ resistant starch ชนิดนี้พบในโครงสร้างพืชที่ถูกทำลายไปบางส่วน เช่น ในเมล็ดธัญพืชที่ถูกดมาบางส่วน เป็นต้น

2. เม็ดแป้งดิบที่ทนทานต่อการทำงานของเอนไซม์ (raw starch granules, RS2) ได้แก่ เม็ดแป้งมันฝรั่งดิบ เม็ดแป้งกล้วยดิบ และแป้งจากเมล็ดถั่ว โดยความคงทนต่อการย่อยของเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างตามธรรมชาติของเม็ดแป้งที่ไม่มีรูหรือช่องเปิดให้เอนไซม์เข้าไปในเม็ดแป้ง ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งได้ยากขึ้น

3. แป้งคืนตัว (retrograded starch, RS3) resistant starch โดยส่วนใหญ่จัดอยู่ในประเภท retrograded starch ได้แก่ อาหารที่ผ่านการให้ความร้อนจนแป้งเกิดเจลาติไนซ์ แล้วถูกทำให้เย็นตัวลง ทำให้ส่วนของอะไมโลส ในน้ำแป้งหลุดออกมาในขณะที่เม็ดแป้งพองตัวเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ได้เป็นผลึกแป้งที่แข็งแรงและทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ดังนั้นแป้งที่มีอัตราส่วน

ของอะไมโลสที่สูงกว่า จะสามารถเกิดรีโทรกราเดชัน ได้มากกว่าแป้งที่มีอะไมโลเพคตินสูง แป้งที่มีอะไมโลสสูงก็สามารถผลิต resistant starch ได้สูงด้วยเช่นเดียวกัน

resistant starch นอกจากจะสามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติแล้ว ยังสามารถเตรียมโดยวิธีการดัดแปรแป้งโดยวิธีการต่างๆดังนี้

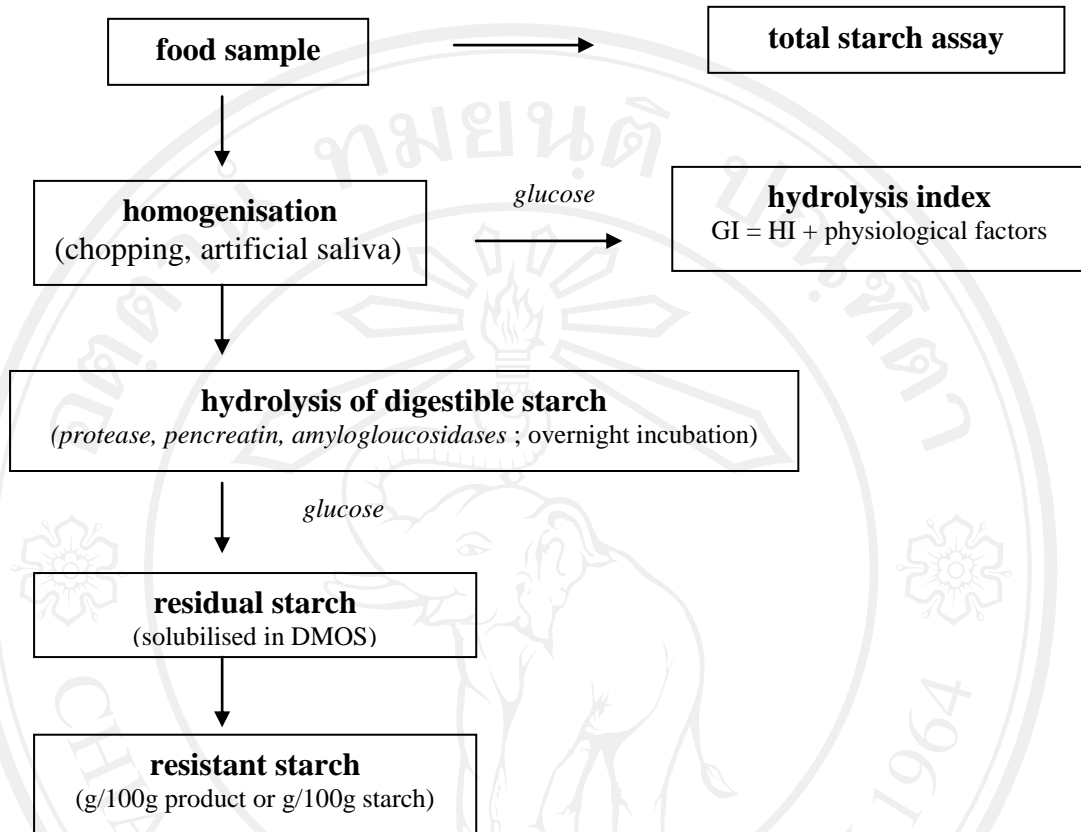
1. การเกิดรีโทรกราเดชันของแป้ง โดยการให้ความร้อนแก่น้ำแป้ง เพื่อให้แป้งสุก แล้วทิ้งให้น้ำแป้งเย็นตัวลง โมเลกุลของแป้งที่ละลายจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ได้เป็นผลึกที่แข็งแรง สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้น้อยลง
2. การใช้เอนไซม์ในการย่อยแป้ง เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการเกิดรีโทรกราเดชัน เช่น การใช้เอนไซม์ α -amylase เพื่อลดขนาดโมเลกุลของแป้งได้เป็น maltodextrin ชนิดที่มีระดับการย่อยต่ำ
3. การใช้กระบวนการความร้อนชื้น (heat-moisture treatment) เป็นการเตรียม resistant starch ของแป้งที่ยังไม่ผ่านการทำให้สุกและมีความชื้นประมาณ 20 – 45% นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 -120 องศาเซลเซียส มีผลทำให้เม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงและจัดเรียงโครงสร้างภายใน ที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มากยิ่งขึ้น
4. การใช้สารเคมีในการดัดแปร เช่น แป้ง acetylated แป้ง hydroxyl propylated และ แป้ง cross-linked เป็นต้น

ในปัจจุบันมีการผลิต resistant starch ในเชิงการค้า ซึ่งมีปริมาณเส้นใยสูง 30 % และมีลักษณะคล้ายผลิตภัณฑ์จากธัญชาติ แต่มีคุณสมบัติที่ดีกว่า คือ สีขาวกว่า ไม่มีกลิ่นธัญชาติที่ไม่พึงประสงค์และมีปริมาณไขมันต่ำในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารนิยมใช้ resistant starch เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ แทนการใช้เส้นใยอาหารจากแหล่งอื่นมากขึ้น เนื่องจาก resistant starch จะมีการอุ้มน้ำไม่มาก จึงสามารถใช้เป็นแหล่งเชื้อใยสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำ เช่น คูกกึ่งขนมปังกรอบ ผลิตภัณฑ์ธัญชาติสำเร็จรูป เมื่อใช้ resistant starch ในอาหาร พบว่าจะไม่ทำให้เนื้อสัมผัสอาหารมีลักษณะหยาบ และไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรสชาติอาหาร จึงเหมาะต่อกระบวนการผลิตและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์จำพวกขนมอบ และผลิตภัณฑ์จากเอกซ์ทรูเดอร์ และ resistant starch จะให้ปริมาณ butyrate สูงกว่าแหล่งเส้นใยอื่น อีกด้วย (ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ, 2544ข)

ประโยชน์ของ resistant starch ต่อสุขภาพ

เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญของ resistant starch คือไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ในเอนไซม์ใน ลำไส้เล็ก ดังนั้น resistant starch จึงมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ซึ่งมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่ายและระบบหมุนเวียนเลือด โดย resistant starch จะผ่านมาถึงส่วนของลำไส้ใหญ่และถูกหมักโดยจุลินทรีย์ภายในลำไส้ใหญ่ได้เป็นกรดไขมันสายสั้นๆ เช่น acetate, proprionate และ butyrate และมีก๊าซเกิดร่วมด้วย กรดไขมันทั้งสามชนิดจะมีสัดส่วนแตกต่างกันตามชนิดของ resistant starch (สายสนม, 2541) และสามารถถูกดูดซึมภายในลำไส้ใหญ่และขนส่งไปถึงตับได้ กรดไขมันที่เกิดขึ้นจะช่วยให้สุขภาพของปลายลำไส้ใหญ่ดีขึ้น โดยกรดไขมันจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เพิ่มปริมาณของเหลวและปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภายในลำไส้ใหญ่ให้ต่ำลง butyrate ที่สร้างขึ้นจะช่วยปรับสภาพตอนปลายของลำไส้ใหญ่ให้สมบูรณ์ ยับยั้งการเจริญของ transformed cell ในสิ่งมีชีวิตซึ่งจะมีบทบาทในการป้องกันมะเร็งในลำไส้ใหญ่ได้ (Alexander, 1995) การเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารในอาหารที่บริโภคจะช่วยทำให้ระบบขับถ่ายทำงานได้ดีขึ้น ช่วยเพิ่มปริมาณและความถี่ในการขับถ่าย และลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคท้องผูก โรคผนังลำไส้อักเสบและมะเร็งในลำไส้ใหญ่ นอกจากนี้การบริโภค resistant starch หรือเส้นใยอาหารจะช่วยป้องกันหรือลดภาวะโรคอ้วน และมีบทบาทในการลดปริมาณคลอเลสเตอรอลในเส้นเลือด ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด โรคหัวใจและโรคเบาหวานอีกด้วย (Ranhotra *et al.*, 1996)

สำหรับการย่อยอาหารประเภทแป้งและคาร์โบไฮเดรตในลำไส้เล็กพบว่าแป้งที่มีปริมาณ RS มากคือแป้งที่สามารถย่อยได้ยากขึ้นจะมีค่า GI น้อยลง ความสัมพันธ์ระหว่าง RS และ GI ดังรูปที่ 2.7 ในการย่อยแป้งในอาหาร 3 ชนิดคือ คอร์นเฟล็ค ข้าวต้ม และขนมทำจากถั่ว พบว่าอาหารไม่ถูกย่อยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณที่รับประทานเข้าไปมีค่า 3.1, 3.1 และ 5.7 % ตามลำดับ ปริมาณ RS เรียงตามลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ pigeon pea, lentil, black gram, field pea, chickpea และ mung bean (Sandhu and Lim, 2008)



รูปที่ 2.7 กลไกจำลองการย่อยแป้ง

ที่มา : Bird *et al.*, (2006)

Chung *et al.*, (2000) ได้ศึกษาผลของการเกิดเจลลิตไนซ์บางส่วนและการคืนตัวของแป้งต่อการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ของถั่วเขียวโดยการทำให้เกิดเจลบางส่วนด้วยความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 60, 65, 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที มีค่า melting enthalpy เท่ากับ 69, 36.7 และ 8.5 มีค่า resistant starch เท่ากับ 8.6, 8.3 และ 7.7 มีค่า GI เท่ากับ 91.5, 92.0 และ 92.7 ตามลำดับ สำหรับแป้งคืนตัวโดยใช้แป้งที่เกิดเจลเต็มทีและเก็บที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 4 และ 7 วัน พบว่าค่า melting enthalpy มีค่า 36.7, 67.2 และ 79.9 resistant starch เท่ากับ 3.0, 3.5 และ 3.8 มีค่า GI เท่ากับ 95.5 95.1 และ 94.3 อัตราการย่อยแป้งและค่า GI เพิ่มขึ้นแต่ melting enthalpy ลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตไนซ์เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามแป้งคืนตัวเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น อัตราการย่อย และค่า GI จะลดลงแต่ melting enthalpy เพิ่มขึ้น

การย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ของอาหารประเภทแป้งทั้งหมดในการทดสอบตัวอย่าง 21 ชนิด (ข้าวเสาไห้ดิบ ข้าวหอมมะลิดิบ ข้าวแดงดิบ ข้าวขาวสุก ขนมหินสุก ข้าวตังแห้ง ข้าวตังทอด ข้าวเกรียบว่าวแห้ง ข้าวเกรียบว่าวย่าง ข้าวเกรียบแห้ง ข้าวเกรียบทอด ขนมหัดพอง จากข้าว เส้นก๋วยเตี๋ยวชนิดต่างๆ วุ้นเส้น ข้าวแผ่น ถั่วเขียว แป้งถั่วเขียวทางการค้า ถั่วดำ ถั่วแดงเม็ดเล็ก ถั่วแดง ลูกเดือย แป้งมันสำปะหลังไข่มุก แป้งมันสำปะหลังทางการค้า แป้งมันสำปะหลังเจลาติน (50 % solids) แป้งข้าวโพดคัดแปรทางการค้า) และกล้วย 11 สายพันธุ์ (กล้วยน้ำว้า กล้วยหอม กล้วยไข่ กล้วยเล็บมือนาง กล้วยหักมุก กล้วยหิน กล้วยงาช้าง กล้วยเล็บช่างกุศ กล้วยนางพญา กล้วยพม่าแหกคุก กล้วยเทพรส) พบว่าถั่วเขียวมีอัตราการย่อยแป้งต่ำที่สุดในช่วง 30 -180 นาที เมื่อเทียบกับอาหารชนิดอื่นๆ total starch (TS) digestible starch (DS), resistant starch (RS) เท่ากับ 44.3 21.4 และ 22.9 ตามลำดับ (Vatanasuchart *et al.*, 2009)

2.8 ดัชนีไกลซีมิก

ดัชนีไกลซีมิก Glycemic Index (GI) เป็นค่าบ่งชี้ว่าคาร์โบไฮเดรตจะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานเพื่อให้ร่างกายนำไปใช้ได้เร็วเพียงใด อาหารโดยทั่วไปที่มีค่าไกลซีมิกสูงจะย่อยสลายเป็นกลูโคสหรือน้ำตาลได้อย่างรวดเร็ว แต่อาหารที่มีค่าไกลซีมิกต่ำจะย่อยสลายช้า และมักเก็บเป็นพลังงานสะสมมากกว่าจะนำไปใช้ทันที

เมื่อรับประทานอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้ง เผือก มัน น้ำตาล ขนมหวาน หรือผลไม้ คาร์โบไฮเดรตในอาหารเหล่านี้ จะถูกย่อยโดยน้ำย่อยในทางเดินอาหาร จนได้เป็นกลูโคส ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดเล็ก สามารถถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด เพื่อนำไปยังส่วนต่างๆ ของร่างกายเพื่อใช้เป็นพลังงาน

การจัดอันดับทางคุณภาพของคาร์โบไฮเดรต มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลกลูโคสในกระแสเลือดหลังจากบริโภคอาหารนั้น เป็นค่าที่พัฒนาโดย Dr. David J. Jenkins และคณะ ในปี ค.ศ. 1981 (Jenkins *et al.*, 1981) โดยค่า GI ของอาหารชนิดหนึ่งๆ เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้กราฟ (area under the hydrolysis curve: AUC) ของการตอบสนองของระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือด หลังจากบริโภคอาหารคาร์โบไฮเดรตนั้นในปริมาณแน่นอนปริมาณหนึ่ง (โดยทั่วไปใช้ 50 กรัม) ต่อ AUC ของอาหารมาตรฐาน ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส หรือขนมปังขาว (white bread) คูณด้วย 100 ค่า GI แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

- กลุ่ม GI สูง มีค่า GI ตั้งแต่ 70 ขึ้นไป อาหารในกลุ่มนี้ ได้แก่ คอรั่นเฟล็ก

มันฝรั่งอบ ข้าวขัดขาว และขนมปังขาว เป็นต้น

- กลุ่ม GI ปานกลาง มีค่า GI ระหว่าง 56- 69 ได้แก่ น้ำตาลทราย ครัวซอง ข้าวกล้องบางชนิด เป็นต้น
- กลุ่ม GI ต่ำ มีค่า GI น้อยกว่า 55 ได้แก่ ธัญชาติ ถั่วเขียว พาสต้า ผักและผลไม้ ส่วนใหญ่ ยกเว้น มันฝรั่ง

GI เป็นดัชนีบ่งบอกอัตราเร็วของการย่อยคาร์โบไฮเดรตในอาหารให้เป็นน้ำตาล กลูโคสและถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด ซึ่งสามารถใช้ค่านี้สำหรับคัดเลือกอาหารที่เหมาะสมสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน โรคหัวใจ และผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก (อัญชลี, 2546)

การรับประทานอาหารคาร์โบไฮเดรตที่มีค่า GI สูงในปริมาณมาก จะทำให้ระดับน้ำตาล กลูโคสในเลือดสูงขึ้น ทำให้ความต้องการอินซูลิน ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่ช่วยในการนำกลูโคสเข้าไปเผาผลาญในเซลล์เพิ่มขึ้น การรับประทานอาหารที่มีดัชนีน้ำตาลสูง จึงเพิ่มโอกาสเสี่ยงต่อการเป็นโรคเบาหวาน และใน ผู้ที่เป็นเบาหวาน การรับประทานคาร์โบไฮเดรตที่มีค่า GI ต่ำ แทนคาร์โบไฮเดรตที่มีค่า GI สูง จะช่วยให้สามารถควบคุมระดับน้ำตาลได้ดีขึ้น การบริโภคอาหารที่มี GI ต่ำเป็นเวลานาน จะลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคเบาหวานและโรคหัวใจ (Foster-Powell *et al*, 2002)

จากเกณฑ์ดังกล่าวจึงประเมินได้ว่าการรับประทานอาหารที่มี GI สูงจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลกลูโคสในกระแสเลือดอย่างรวดเร็วและสูงมาก ในขณะที่การรับประทานอาหารที่มี GI ต่ำจะมีการปลดปล่อยของน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือดอย่างช้าๆและสม่ำเสมอทำให้ร่างกายสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในระดับปกติได้ง่ายกว่าซึ่งสำคัญสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวานหรือผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก

Goni *et al.*, (1997) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการหาค่า GI ในหลอดทดลอง (in-vitro) และนำไปเปรียบเทียบกับสิ่งมีชีวิตทดลอง (in-vivo) เพื่อหาความสัมพันธ์ การวิเคราะห์ทำโดยใช้วิธีการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ α -amylase และ amyloglucosidase อัตราการย่อยสตาร์ชแสดงในรูปร้อยละการย่อยของสตาร์ช (% total starch) ที่ถูกย่อยที่เวลาต่างๆกัน เขียนกราฟระหว่างอัตราการย่อยกับเวลา (hydrolysis curve) คำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟตั้งแต่ 0-180 นาที (AUC) จากนั้นคำนวณ Hydrolysis Index (HI) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง AUC ของอาหารและ AUC ของอาหารอ้างอิง (ขนมปังขาว) หาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง HI และ GI พบว่าได้

ความสัมพันธ์ดังกล่าว GI = $39.21 + 0.803 (H_{90})$ เมื่อ H_{90} คือเปอร์เซ็นต์ของแป้งที่ถูกย่อยเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที

การวัดค่า GI ด้วยวิธี in-vivo จะใช้ผู้ทดสอบที่มีสุขภาพดีที่ผ่านการเตรียมร่างกายให้พร้อมสำหรับการทดสอบ โดยให้ผู้ทดสอบบริโภคอาหารที่ต้องการทดสอบ ได้แก่ สปาเกตตี้ที่ทำจากถั่วเหลืองและสปาเกตตี้ที่ทำจากถั่วเลนทิล แล้ววัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสในเลือดจากนั้นเปรียบเทียบกับอาหารที่มีค่า GI เท่ากับ 100 โดยใช้ขนมปังขาวหรือน้ำตาลกลูโคส ในการศึกษาพบว่าสปาเกตตี้ที่ทำจากถั่วเหลืองค่า GI เท่ากับ 76.8 ± 43.4 และมีดัชนีการย่อยแป้ง (starch digestion index (SDI)) เท่ากับ 57 สำหรับสปาเกตตี้ที่ทำจากถั่วเลนทิลมีค่า GI เท่ากับ 49.3 ± 29.5 และมี SDI เท่ากับ 54 (Araya *et al.*, 2003) แต่วิธีการ in-vivo มีความยุ่งยากและใช้เวลานานจึงไม่นิยม

Frei *et al.*, (2003) ใช้วิธีการของ Goni *et al.*, (1997) และได้ปรับปรุงสมการความสัมพันธ์ดังนี้ $GI = 39.71 + (0.549 \times HI)$ ใช้ในการศึกษาข้าวทาสายพันธุ์ของฟิลิปปินส์ที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกันโดยทำการทดลองแบ่งเป็นสองการทดลอง คือ วิเคราะห์ค่า GI ทันทีหลังจากปรุงสุก และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังการปรุงสุกซึ่งทำให้เกิดการคืนตัวของแป้ง พบว่าค่า GI แต่ละสายพันธุ์อยู่ในช่วง 68-89 สำหรับการทดลองแรกและ 64-87 สำหรับการทดลองที่สอง การย่อยแป้งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ สำหรับสายพันธุ์ waxy มากกว่าสายพันธุ์ที่มีอะไมโลสสูง การเก็บข้าวไว้ในตู้เย็นทำให้ค่า GI ลดลงทุกสายพันธุ์ และสายพันธุ์ waxy มีค่าลดลงมากที่สุด

ถั่วเขียวสามสายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศแคนาดา พบว่าการตัดแปรแป้งถั่วเขียวทั้งสามสายพันธุ์มีค่า GI ประมาณ 12.0-12.2 สำหรับสตาร์ชของถั่วเขียวทั้งสามสายพันธุ์มีค่า GI ถึง 65.8 - 68.4 และสตาร์ชมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าแป้งตัดแปร (Chung *et al.*, 2008) ส่วนการศึกษาถั่ว 6 ชนิด ได้แก่ black gram, chickpea, mung bean, lentil, field pea และ pigeon pea พบว่าค่า HI ของถั่วที่ศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 8.2-20.0 และประมาณค่า GI จาก HI ได้ระหว่าง 44.2 - 50.7 และพบว่า การย่อยของสตาร์ชมีความสัมพันธ์เชิงลบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช และน้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลเพคตินและอะไมโลส (Sandhu and Lim, 2008) ธัญวรินทร์ได้ศึกษา ค่า GI ของขนมเทียนสูตรดัดแปลง พบว่าภายหลังรับประทานขนมเทียนสาकुเมล็ดเล็กมีค่า GI มากที่สุด รองลงมาคือสูตรมาตรฐาน สูตรแป้งข้าวเหนียวดำ สูตรดัดแปลงได้จากสูตรมาตรฐาน และสูตรแป้งถั่วเขียวมีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่า GI คือ 82, 72, 71, 61 และ 57 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของระดับไตรกลีเซอไรด์ในเลือดที่ 5 ชั่วโมง ภายหลังรับประทานขนมทุกสูตร เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ แต่ไม่มีความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเลือดที่ 5 ชั่วโมง (ธัญวรินทร์, 2548)

การเร่งความเก่าข้าวกล้องหอมมะลิด้วยเทคนิคฟลูอิดไอเซชันร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศ พบว่าการเก็บข้าวเปลือกด้วยวิธีธรรมชาติไม่ส่งผลต่อการลดลงของค่า GI ในขณะที่การเร่งความเก่าด้วยวิธีทางความร้อนจะส่งผลต่อค่า GI ให้ลดลง แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเม็ดแป้งหลังผ่านกระบวนการทางความร้อน มีส่วนไปขัดขวางการย่อยของเอนไซม์ทำให้ย่อยได้ยากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น และระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศนานขึ้น ยังส่งผลต่ออัตราการย่อยต่างๆลดลง โดยข้าวกล้องหอมมะลิที่ถูกเก็บไว้ในที่อับอากาศเป็นเวลานานขึ้นจะส่งผลให้ค่า HI ลดลง ทั้งนี้จะมาจาก amylose lipid complexes ถูกสร้างขึ้นระหว่างกระบวนการทางความร้อน จึงไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ทำให้ย่อยได้ช้าลง ค่า GI ที่ได้จากการทดลองนี้อยู่ในช่วง 59- 63 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน โดยการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้น 33.3% น้ำหนักแห้ง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา 120 นาที จะให้ค่า GI ต่ำสุด เท่ากับ 59.9 จึงน่าจะเป็นทางเลือกสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวานในการเลือกบริโภค (คลฤดีและคณะ, 2550; อัญชลี, 2546; Foster-Powell *et al.*, 2002)